



Développement d'une stratégie d'identification d'un nouveau modèle de zones cohésives adapté à l'étude du délaminage dans les composites stratifiés

Thomas Vandellos, Nicolas Carrère, Cédric Huchette, Éric Martin

► To cite this version:

Thomas Vandellos, Nicolas Carrère, Cédric Huchette, Éric Martin. Développement d'une stratégie d'identification d'un nouveau modèle de zones cohésives adapté à l'étude du délaminage dans les composites stratifiés. 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun 2011, Poitiers-Futuroscope, France. pp.118. hal-00598106

HAL Id: hal-00598106

<https://hal.science/hal-00598106>

Submitted on 4 Jun 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Développement d'une stratégie d'identification d'un nouveau modèle de zones cohésives adapté à l'étude du délaminage dans les composites stratifiés

Development of a strategy to identify a new cohesive zone model adapted to the study of the delamination in laminated composites

Vandellos Thomas¹, Carrère Nicolas¹, Huchette Cédric¹ et Martin Éric²

1 : Onera – The French Aerospace Lab
F-92322 Châtillon, France
e-mail : thomas.vandellos@onera.fr, cedric.huchette@onera.fr

2 : Laboratoire des Composites Thermostructuraux
3 Allée de la Boétie 33600 Pessac CEDEX
e-mail : martin@lcts.u-bordeaux1.fr

Résumé

Le délaminage est l'un des endommagements les plus critiques en terme de tenue mécanique des structures en composites stratifiés. Afin de prédire ce mécanisme d'endommagement, les modèles de zones cohésives semblent être l'approche la plus adaptée. Dans une première partie, les points essentiels d'un modèle de zones cohésives pour décrire le délaminage dans un stratifié carbone/époxy sont mis en évidence dans le but de proposer un nouveau modèle de zones cohésives plus adapté. Puis dans une seconde partie, une stratégie d'identification originale est proposée. Cette dernière s'appuie (i) sur une procédure expérimentale sur des cornières afin d'identifier le critère d'amorçage et (ii) sur un essai original de traction sur plaque rainurée pour déterminer le critère de propagation. Ces deux procédures permettent également d'identifier les différents critères en fonction du niveau d'endommagement intralaminare.

Abstract

One of the most critical damage mechanisms of laminated composite is the delamination. In order to predict this damage, cohesive zone models seem to be the most adapted approach. In a first part, the essential points of cohesive zone model to describe the delamination into a carbon/epoxy laminates are underlined in order to propose an adapted cohesive zone model. Then, in a second part, an original identification strategy is proposed. This one leans on (i) an experimental procedure on L-angle specimen to identify the onset criterion and (ii) an original tensile test on a notched specimen to determine the propagation law. The influence of intra-ply damage on the criteria is also identified thanks to the experimental procedures.

Mots Clés : Délaminage, Modèle de zones cohésives, Identification

Keywords : Delamination, Cohesive Zone Model, Identification

1. Introduction

Les composites stratifiés sont utilisés depuis plusieurs années pour la fabrication de pièces aéronautiques et dont notamment les structures de classe A, car ils représentent un atout majeur pour l'allègement de ces structures sans réduire la tenue mécanique de la pièce. Néanmoins, le manque de confiance dans la modélisation des endommagements des composites stratifiés conduit à des facteurs de sécurité importants qui engendrent un surdimensionnement de ces structures. L'un des endommagements les plus critiques des composites stratifiés est le délaminage (*i.e.* la décohésion de deux plis du stratifié) qui peut apparaître sous différents chargements (impacts à faible vitesse, sollicitations tridimensionnelles...) ou encore à partir de défauts de fabrication. Une perte des propriétés mécaniques de la structure et une perte de rigidité de cette dernière lorsqu'elle est soumise en compression sont les conséquences majeures du délaminage. C'est pourquoi un enjeu primordial pour les industries aéronautiques est l'amélioration de la modélisation de ce mécanisme d'endommagement.

Différents niveaux de modélisations peuvent être utilisés pour décrire le délaminage. Les critères de rupture [1,2], formulés en contrainte ou en déformation, couplés à une longueur interne bien souvent délicate à identifier, sont classiquement utilisés pour décrire l'amorçage du délaminage. La propagation de ce mécanisme d'endommagement peut quant à elle être décrite grâce à la mécanique élastique linéaire de la rupture [3-5]. Il a été montré que pour décrire de façon correcte l'amorçage du délaminage, il est nécessaire de coupler ces deux types d'approches [6,7]. Les modèles de zones cohésives (MZC) [8,9] intègrent ces deux types de critères et présentent en plus l'avantage de décrire le délaminage même en présence de comportements non-linéaires (géométriques ou matériaux). La capacité de cette dernière approche à modéliser les deux aspects du délaminage permet de conclure que les MZC semblent être la méthode la plus adaptée pour l'étude du délaminage dans les calculs de structures. Cependant, une des limitations des MZC pour l'étude du délaminage dans les structures composites stratifiées concerne l'identification des paramètres du modèle. De plus, bien qu'il existe de nombreux modèles dans la littérature [10-13], aucun d'entre eux ne semble avoir tous les ingrédients nécessaires pour l'étude du délaminage dans les stratifiés carbone/époxy.

L'objectif de cette étude est (i) de mettre en avant les aspects nécessaires à une description précise du délaminage dans les stratifiés carbone/époxy afin de pouvoir proposer un nouveau modèle de zones cohésives adapté et (ii) de proposer une stratégie d'identification des différents aspects de ce modèle. Pour cela, une présentation des modèles de zones cohésives et des améliorations souhaitées est proposée dans une première partie. Puis, dans une seconde partie, l'élaboration d'une procédure d'identification des paramètres liés à l'amorçage et à la propagation du délaminage est présentée. Cette stratégie prend également en compte le couplage inter/intralaminaire (*i.e.* l'influence de l'endommagement des plis sur le délaminage).

2. Présentation des modèles de zones cohésives et les améliorations proposées

2.1 Rappel sur les modèles de zones cohésives

Les modèles de zones cohésives (MZC), basés sur la mécanique de l'endommagement, permettent de modéliser l'amorçage et la propagation d'une fissure grâce à des éléments d'interface insérés entre deux éléments solides classiques. Dans cette étude, ces éléments sont insérés entre deux plis afin de décrire le délaminage dans les stratifiés, comme illustré sur la Fig. 1.

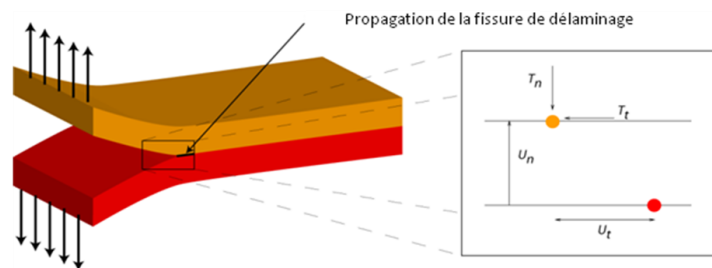


Fig. 1. Propagation du délaminage sur un essai DCB et sa représentation locale.

Le but des MZC est d'établir une loi de comportement endommageable entre les plis afin de décrire le délaminage. Pour cela, les MZC décrivent la relation entre les sauts de déplacements de deux nœuds initialement superposés $[u_i]$ ($i=1,2$ ou 3 selon le mode pur de rupture) et les efforts cohésifs associés T_i via une loi adoucissante décrivant l'endommagement progressif de l'interface jusqu'à sa rupture finale. Plusieurs formes de lois existent dans la littérature : trapézoïdale, exponentielle, polynômiale [13,14]. Cependant, quelque soit la forme choisie, deux paramètres sont communément définies *a minima* pour chaque mode de rupture: la contrainte interfaciale maximale σ_{max}^i (*i.e.* l'effort cohésif maximum dans la relation liant les efforts cohésifs aux sauts de déplacement) et la ténacité G_i^C (*i.e.* le taux de restitution d'énergie par unité de surface nécessaire à la rupture de l'interface, soit l'aire sous la courbe « effort cohésif/saut de déplacement »). Il est

également nécessaire de définir un critère de rupture pour l'amorçage et une loi de propagation lors de sollicitation en mode mixte du délaminage (*i.e.* différent d'un mode pur), comme l'illustre la Fig. 2.

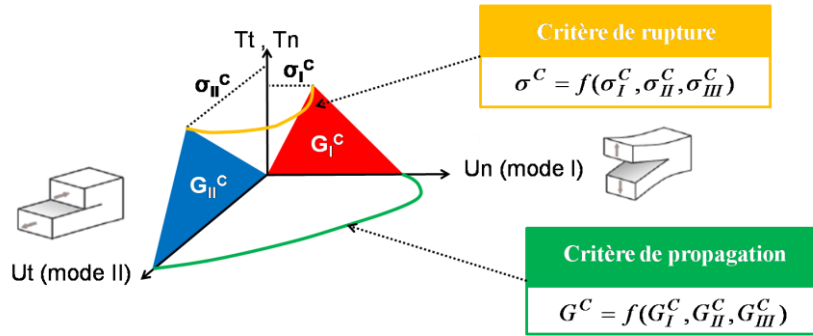


Fig. 2. Description des modèles de zones cohésives.

2.2 Améliorations proposées pour les modèles de zones cohésives

Afin de pouvoir étudier de manière précise le délaminage dans les stratifiés carbone/époxy, il semble nécessaire de proposer un modèle ayant (i) un critère d'amorçage décrivant un renforcement en compression/cisaillement, (ii) un critère de propagation adapté et (iii) la capacité de prendre en compte le couplage inter/intralaminaire (*i.e.* l'influence de l'endommagement des plis sur l'amorçage et la propagation de la fissure). Même si certains modèles de zones cohésives proposent un critère de propagation adapté à l'étude des stratifiés carbone/époxy ou encore la prise en compte de l'endommagement intralaminaire sur la propagation du délaminage, il n'existe pas encore de modèle complet pour l'étude de ce mécanisme d'endommagement.

Dans la plupart des MZC, un critère de contrainte maximale ou un critère quadratique formulé en contrainte pilote l'amorçage. Or, ces critères ne permettent pas de décrire le renforcement de la tenue de l'interface lorsqu'elle est soumise en compression/cisaillement comme cela a été mis en évidence dans [2]. Aussi, un critère, permettant de conserver l'effet de renforcement et s'appuyant sur les contraintes positives [15], est proposé (Eq. 1).

$$\left(\frac{\sigma_{33}^+}{Z_t} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}^+}{S_{13}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{23}^+}{S_{23}} \right)^2 = 1 \quad (\text{Eq. 1})$$

avec Z_t la résistance maximale en traction pur et S_{13} et S_{23} les résistances maximales pour les modes purs de cisaillement. La Fig. 3 illustre dans le plan (σ_{33} , τ_{13}) l'apport de ce critère d'amorçage par rapport aux critères utilisés classiquement dans les modèles de zones cohésives.

Afin de décrire précisément la propagation du délaminage dans les stratifiés carbone/époxy, un critère de propagation adapté est nécessaire. Là encore, de nombreuses études [16,17] ont permis de démontrer la nécessité d'utiliser l'un des deux critères suivants : le critère elliptique (Eq. 2) ou le critère de Benzeggagh-Kenane [18] (Eq. 3). Même si le critère de Benzeggagh-Kenane semble le plus adapté d'après les études de Camanho *et al.* [19], la dispersion des résultats expérimentaux ne permet pas de discriminer clairement l'un des critères par rapport à l'autre.

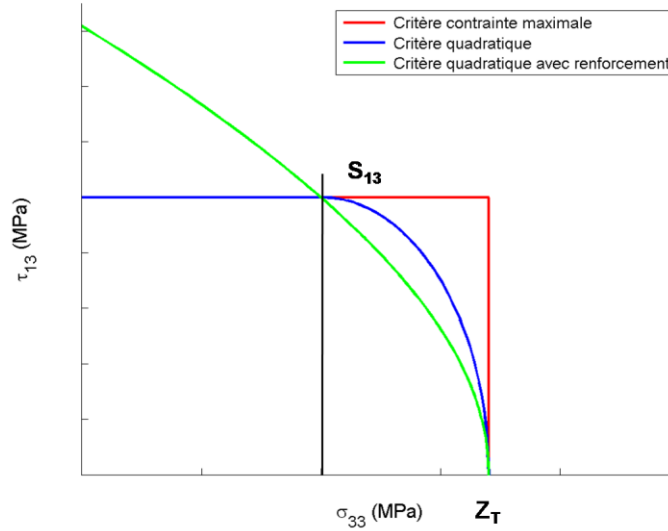


Fig. 3. Comparaison du critère quadratique et du critère avec renforcement en compression/cisaillement dans le plan (σ_{33}, τ_{13}) .

$$\left(\frac{G_I}{G_I^C}\right)^2 + \left(\frac{G_{II}}{G_{II}^C}\right)^2 + \left(\frac{G_{III}}{G_{III}^C}\right)^2 = 1 \quad (\text{Eq. 2})$$

$$G_I^C + (G_{II}^C - G_I^C) \left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}} \right)^\eta = G^C \quad (\text{Eq. 3})$$

Dans le but de décrire le délaminage dans les stratifiés carbone/époxy, un modèle de zones cohésives prenant en compte le critère d'amorçage avec renforcement et un critère de propagation, parmi ceux présentés ci-dessus, a été développé. Ce dernier, représenté sur la Fig. 4, est régi par les équations suivantes (Eq. 4) :

$$\begin{cases} T_i = K[u_i] & \text{si } [u] < \delta_0 \\ T_i = K[u_i](1 - \lambda^2)^2 & \text{si } \delta_0 \leq [u] \leq \delta_C \\ T = 0 & \text{si } [u] > \delta_C \end{cases} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$\lambda = \left(\frac{\delta_C([u] - \delta_0)}{[u](\delta_C - \delta_0)} \right)^2 \quad \text{avec } [u] = \sqrt{\sum [u_i]^2}$$

où T_i est l'effort cohésif du mode pur i (respectivement 1, 2, 3 pour le mode I, le mode II et le mode III), $[u_i]$ le saut de déplacement associé, $[u]$ la somme des sauts de déplacement des modes purs, K la raideur de la partie élastique du modèle (considérée comme identique quelque soit le mode de sollicitation) et λ la variable d'endommagement. Le paramètre δ_0 correspond au saut de déplacement pour lequel le critère d'amorçage est vérifié. En écrivant qu'à rupture, on a (Eq. 5), δ_0 s'écrit alors en fonction de la mixité de mode, des résistances et de la rigidité (voir Annexes).

$$\begin{cases} \sigma_{33} = K \cos \theta \delta_0 & ; \quad \tau_{13} = K \sin \theta \cos \omega \delta_0 & ; \quad \tau_{23} = K \sin \theta \sin \omega \delta_0 \\ \theta = \arccos([u_1]/[u]) & \text{et } \omega = \arctan([u_3]/[u_2]) \end{cases} \quad (\text{Eq. 5})$$

Le paramètre δ_C correspondant au saut de déplacement pour lequel l'interface est rompue ($G=G_C$). G_C s'écrit analytiquement sous la forme :

$$G_C = K \left(a_0(\delta_C - \delta_0) + \frac{a_1}{2}(\delta_C^2 - \delta_0^2) + a_2(\log(\delta_C) - \log(\delta_0)) - a_3 \left(\frac{1}{\delta_C} - \frac{1}{\delta_0} \right) - \frac{a_4}{2} \left(\frac{1}{\delta_C^2} - \frac{1}{\delta_0^2} \right) + \frac{\delta_0^2}{2} \right)$$

$$\text{avec } \begin{cases} a_0 = 4b\delta_0(1-b); a_1 = (1-b)^2; a_2 = 2b\delta_0^2(3b-1); a_3 = -4b^2\delta_0^3; a_4 = b^2\delta_0^4 \\ b = \frac{\delta_C^2}{(\delta_C - \delta_0)^2} \end{cases}$$

À mixité de mode donnée, la valeur de G_C étant définie par le critère de propagation (Eq. 2 ou 3) et celle de δ_0 par la résolution de l'Eq. 1, le paramètre δ_C est déterminé par la résolution par Newton-Raphson de l'Eq. 6.

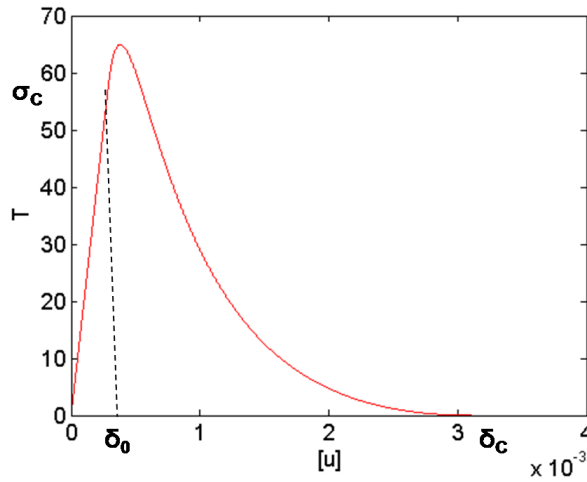


Fig. 4. Représentation de l'évolution de l'effort cohésif T en fonction du saut de déplacement $[u]$ du nouveau modèle de zones cohésives

Pour finir, dans les cas structuraux l'endommagement des plis et le délaminage peuvent interagir, comme par exemple lors d'impact sur le stratifié (voir Fig. 5). Il est alors nécessaire de prendre en compte le couplage inter/intralaminaire afin de décrire précisément le pattern associé au délaminage. Pour cela, la dégradation des propriétés mécaniques de l'interface en fonction du niveau d'endommagement des plis adjacents à l'interface considérée doit être décrite. Ceci peut être réalisé de différentes manières : (i) en rajoutant une variable d'endommagement dans les modèles de zones cohésives traduisant l'endommagement des plis à prendre en compte au niveau de l'interface ou encore (ii) en dégradant les propriétés physiques de l'interface (σ_{max}^i et G_i^C) en fonction du niveau de l'endommagement intralaminaire.

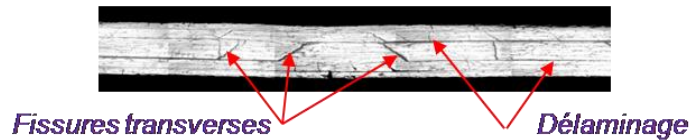


Fig. 5. Observation de l'interaction des endommagements intralaminaires et du délaminage dans un stratifié carbone/époxy après un essai d'impact.

Les différents aspects présentés ci-dessus doivent être pris en compte pour décrire de façon satisfaisante le délaminage dans les composites stratifiés. Cependant, afin que ce modèle soit efficace, il est également nécessaire de pouvoir identifier d'une manière robuste et objective l'ensemble des paramètres du modèle retenu. Une stratégie d'identification du critère d'amorçage et

du critère de propagation en fonction du niveau d'endommagement intralaminare a ainsi été développée.

3. Développement d'une stratégie d'identification du modèle de zones cohésives

L'identification complète du modèle de zone cohésive proposé repose sur :

1. l'identification des résistances (i) en cisaillement hors-plan et (ii) en traction hors-plan
2. l'identification (i) des ténacités en modes purs I et II et (ii) du critère de mixité de mode.

Ce travail a fait l'objet du second point, le lecteur intéressé par l'identification et la validation du critère de rupture hors-plan pourra se reporter à [20] pour plus de détails.

Afin de déterminer les ténacités d'une interface, une procédure utilisant différents essais classiques de la rupture est généralement utilisée. Un essai DCB (Double Cantilever Beam) est exploité pour identifier le taux de restitution d'énergie critique en mode I tandis qu'un essai ENF (End-Notched Flexure) est utilisé pour le mode II. Afin de caractériser la propagation du délaminage en mode mixte, plusieurs essais peuvent être retrouvés dans la littérature. Parmi eux, l'essai MMB (Mixed-Mode Bending) est le plus utilisé car il permet d'étudier différentes mixités de mode (comprises entre le mode I et le mode II). Grâce à l'ensemble de ces essais, un critère de propagation peut être identifié. Cependant, compte-tenu de la dispersion des résultats expérimentaux, il est souvent difficile de choisir le modèle le plus adapté et de l'identifier avec précision. De plus, l'ensemble de la procédure reste longue et coûteuse et est difficilement applicable aux cas des interfaces $0^\circ/\theta^\circ$, qui sont les plus fréquemment rencontrées en pratique. Les sources de difficulté sont multiples mais nous pouvons citer les problèmes de saut du délaminage d'une interface à une autre ou l'apparition d'endommagement intralaminare dans le stratifié lors de l'essai de caractérisation.

Afin de réduire ces limitations, l'exploitation d'un essai de traction sur plaque rainurée est proposée dans ce travail. Le principe de cet essai, développé à l'Onera, est présenté dans la Fig. 6. Il permet d'étudier le délaminage à une interface $0^\circ/\theta^\circ$ ainsi que l'influence de l'endommagement intralaminare (fissurations transverses et microdélaminages) sur la propagation du délaminage. Afin de suivre la propagation du délaminage au cours de l'essai effectué à déplacement imposé, une caméra reliée à un microscope est utilisée. Cette dernière est montée sur des tables micrométriques (voir Fig. 7) permettant de suivre la propagation du délaminage et la possible interaction de ce dernier avec les microdélaminages présents en pointe de fissures transverses le long de l'éprouvette. Enfin, des études expérimentales et numériques [21] ont permis de démontrer que cet essai est reproductible et qu'il propose une propagation stable de la fissure au cours de l'essai. Ces conclusions sont nécessaires pour utiliser l'essai de traction sur plaque rainurée pour identifier le taux de restitution d'énergie critique de l'interface.

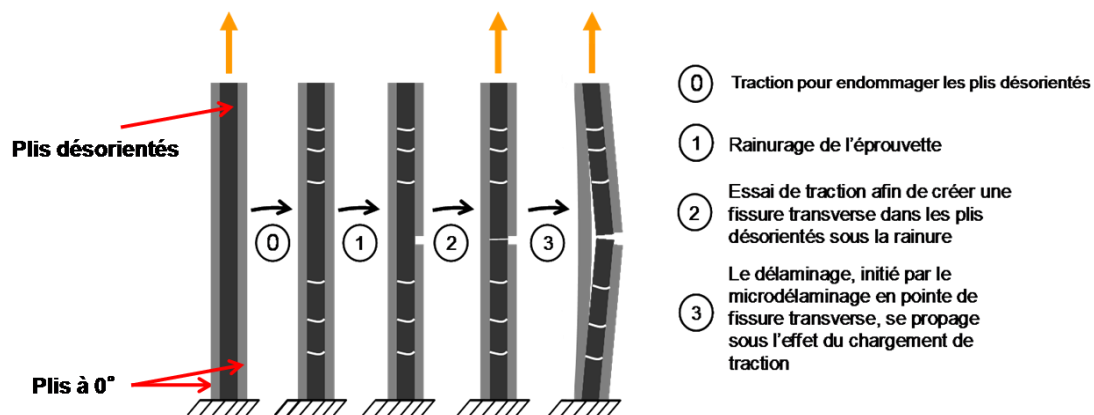


Fig. 6. Principe de l'essai de traction sur plaque rainurée.

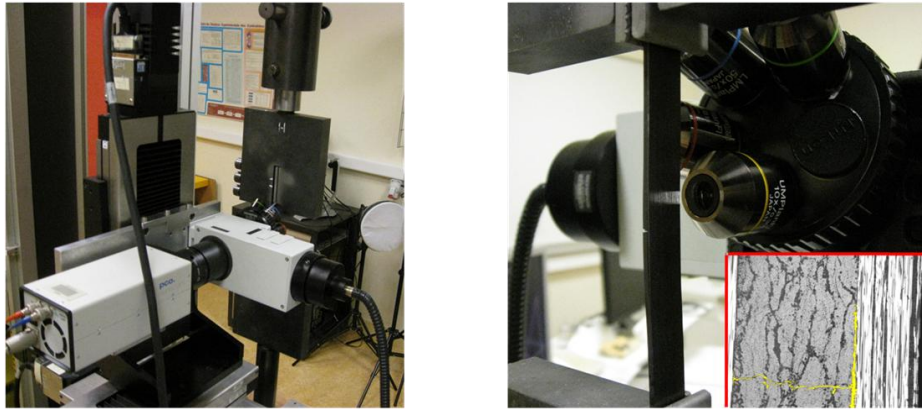


Fig. 7. Dispositif expérimental de l'essai et zoom sur l'observation de l'éprouvette par microscope.

Contrairement aux essais classiquement utilisés, l'identification de la ténacité requière une simulation numérique par la méthode VCCT (Virtual Crack Closure Technique). Cette méthode qui se base sur la mécanique élastique linéaire de la rupture et dont le principe consiste à calculer l'énergie nécessaire pour refermer une fissure d'une longueur Δa en supposant que cette dernière est égale à l'énergie pour ouvrir cette fissure, permet de déterminer la ténacité de l'interface à partir du déplacement imposé à l'éprouvette et de la longueur de fissure associée.

Ainsi, cette méthode VCCT a été appliquée sur une interface ($0^\circ/90^\circ$) à partir de plusieurs essais sur des éprouvettes $[0_2/90_2]_S$ de carbone/époxy T700GC/M21 dont le pli à une épaisseur de $260\mu\text{m}$. Les résultats obtenus lors de la campagne expérimentale menée à l'Onera et illustrés sur la Fig. 8, permettent de conclure (i) que cet essai propose un nombre de données deux fois plus important qu'un essai classique grâce aux deux fronts du délaminage qui se propagent de manière quasi-symétrique à partir de la fissure transverse située droit en dessous de la rainure, (ii) que la dispersion de cet essai (environ $\pm 100 \text{ J/m}^2$) est de l'ordre de la dispersion des essais utilisés classiquement et (iii) que l'essai propose une mixité de mode qui évolue au cours de l'essai entre 15% et 35% de mode II (la mixité de mode étant calculée par le ratio entre l'énergie de cisaillement et l'énergie totale). Notons que le mode III (cisaillement anti-plan) est négligeable au cours de cet essai.

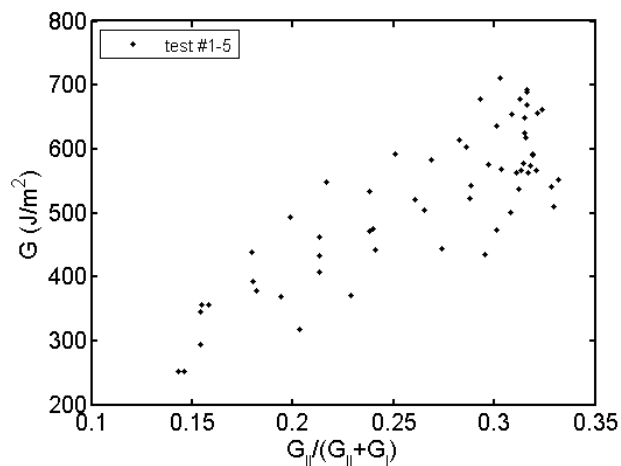


Fig. 8. Identification de la ténacité d'une interface $0^\circ/90^\circ$ d'un carbone/époxy T700GC/M21 à partir de 5 essais de traction sur plaque rainurée sur des stratifiés $[0_2/90_2]_S$.

La mixité de mode de l'essai de traction sur plaque rainurée évoluant au cours de l'essai, l'identification du critère de propagation peut être effectuée en utilisant les résultats expérimentaux obtenus. La représentation des données expérimentales dans le plan (G_{II}, G_I) démontre un renforcement proche du mode I pur et permet de favoriser le critère de Benzeggagh-Kenane à celui

elliptique pour la description de la propagation du délaminage dans les stratifiés carbone/époxy. Ainsi, une enveloppe de critères de propagation admissibles, utilisant différents jeux de paramètres de la loi de Benzeggagh-Kenane, a été déterminée (voir Fig. 9). La mixité de l'essai de traction sur plaque rainurée étant comprise entre 15% et 35% de mode II, la détermination de cette enveloppe conduit à une forte dispersion sur l'estimation de la ténacité en mode II. La réalisation d'un essai proche du mode II pur permettrait de palier cette dispersion et d'identifier les paramètres de propagation des MZC avec une campagne d'essais bien plus rapide que classiquement.

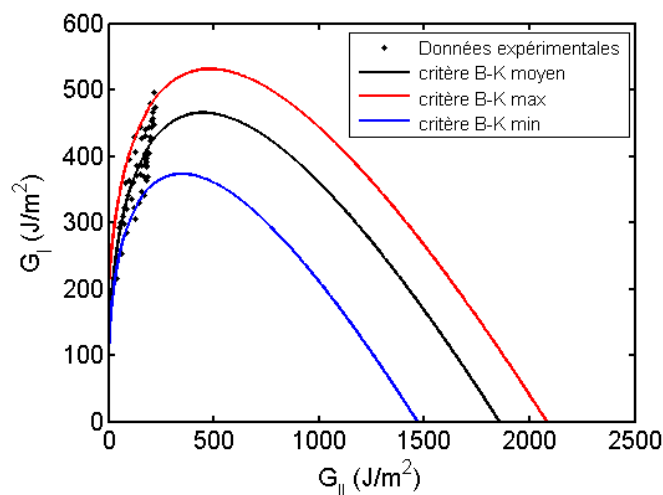


Fig. 9. Identification d'une enveloppe de critères de propagation admissibles par l'essai de traction sur plaque rainurée.

Enfin un autre apport de l'essai de traction sur plaque rainurée tient dans la possibilité d'observer l'influence de l'endommagement intralaminare des plis adjacents sur la propagation du délaminage de l'interface considérée. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser la première étape décrite dans la Fig. 6 qui consiste à endommager le matériau par un essai de traction avant de réaliser la rainure. Le même dispositif expérimental présenté précédemment est également utilisé pour déterminer le taux de fissuration transverse ρ (*i.e.* le nombre de fissures transverses divisé par la longueur utile de l'éprouvette) et le taux de microdélaminage μ (*i.e.* la longueur cumulée des microdélaminages divisée par la longueur utile de l'éprouvette) [22]. Le suivi de l'évolution de l'endommagement des plis durant l'essai de propagation du délaminage à partir de la rainure indique que les taux de fissuration transverse et de microdélaminage restent constants au cours de l'essai. Il semble alors possible de déterminer l'influence d'un niveau d'endommagement intralaminare spécifique sur la propagation du délaminage. Pour cela, plusieurs états d'endommagements ont été testés sur des stratifiés $[0_2/90_2]_S$ de carbone/époxy T700GC/M21. Comme le montre la Fig. 10, les résultats de la propagation du délaminage au cours de l'essai en fonction du taux de fissuration transverse ne permettent pas de déterminer clairement l'influence de l'endommagement intralaminare sur la propagation de la fissure. En effet, quelque soit l'état d'endommagement étudié, la courbe « longueur de fissure/déplacement » est comprise dans la dispersion des courbes associées à l'état non endommagé. Néanmoins, grâce au dispositif expérimental de l'essai, on observe localement une interaction entre les endommagements intralaminaires et le délaminage. Afin d'exploiter au mieux l'observation de ce phénomène, une campagne d'essais sur un nouvel empilement est actuellement en cours.

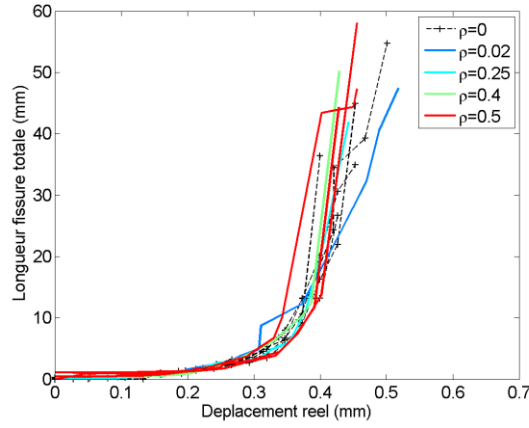


Fig. 10. Description de la longueur de fissure en fonction du déplacement imposé à partir de plusieurs essais de traction sur plaque rainurée $[0_2/90_2]_S$ de carbone/époxy T700GC/M21 avec différents états d'endommagement.

4. Conclusions et perspectives

Afin de modéliser le délaminage dans des structures complexes, les modèles de zones cohésives semblent être l'approche la plus adaptée car ils permettent de décrire l'amorçage et la propagation de la fissure. Bien qu'il existe de nombreuses lois, aucune ne semble avoir tous les ingrédients pour étudier le délaminage dans un stratifié carbone/époxy. C'est pourquoi la première partie de ce travail met en avant le développement d'un nouveau modèle de zones cohésives incluant (i) un critère de rupture décrivant un renforcement sous un chargement en compression/cisaillement, (ii) un critère de propagation permettant la description de la propagation de la fissure dans un carbone/époxy et (iii) la prise en compte du couplage inter/intralaminaire. Afin de pouvoir utiliser une telle loi, la seconde partie de ce travail présente le développement d'une stratégie d'identification. Cette stratégie a deux avantages. Elle permet (i) l'identification du critère de rupture à partir d'essais simples représentatifs des structures aéronautiques et (ii) l'identification du critère de propagation sur une interface $0^\circ/0^\circ$ à partir d'un essai original de traction sur plaque rainurée. Les premiers résultats de l'essai de traction sur plaque rainurée endommagée ne semblent pas permettre de déterminer la dégradation des propriétés de l'interface en fonction du niveau d'endommagement intralaminaire. Néanmoins, des essais complémentaires sur de nouveaux empilements sont en cours afin d'exploiter pleinement les avantages de l'essai de traction sur plaque rainurée.

Dans un premier temps, une perspective de ce travail consiste à proposer une stratégie d'identification complète intégrant la problématique du couplage inter/intralaminaire. Dans un second temps, l'application du nouveau modèle de zones cohésives sur des cas structuraux plus complexes (essai de traction sur plaque trouée, essai de traction sur plaque entaillée, poinçonnement...) devrait démontrer l'apport de cette approche.

5. Annexes

La détermination du paramètre δ_0 s'effectue par la résolution du critère d'amorçage sous la forme des contraintes positives (Eq. 1) avec :

$$\sigma_{33}^+ = a_{33}\sigma_C = Ka_{33}\delta_0 \quad ; \quad \tau_{13}^+ = a_{13}\sigma_C = Ka_{13}\delta_0 \quad ; \quad \tau_{23}^+ = a_{23}\sigma_C = Ka_{23}\delta_0 \quad \text{où}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{33} = \frac{\tilde{a}^3}{\tilde{a}^2 + \sin^2 \theta} \quad ; \quad a_{13} = \left(\frac{\tilde{a}^2 \sin \theta \cos \omega}{\tilde{a}^2 + \sin^2 \theta} \right) \left(\frac{Z_T}{S_{13}} \right) \quad ; \quad a_{23} = \left(\frac{\tilde{a}^2 \sin \theta \sin \omega}{\tilde{a}^2 + \sin^2 \theta} \right) \left(\frac{Z_T}{S_{23}} \right) \\ \tilde{a} = \frac{\cos \theta + \sqrt{\cos^2 \theta + 4 \sin^2 \theta}}{2} \end{array} \right. \quad (\text{Eq. 7})$$

Les paramètres a_{33} , a_{13} et a_{23} correspondent au part des différents modes purs dans la détermination de δ_0 . En reportant (Eq. 7) dans (Eq.1), on obtient :

$$\delta_0 = \frac{\delta_0^*}{\sqrt{(a_{33})^2 + (a_{13})^2 + (a_{23})^2}} \quad \text{avec} \quad \delta_0^* = \frac{Z_T}{K} \quad (\text{Eq. 8})$$

Références

- [1] A.C.ORIFICI, I.HERSZBERG, R.S.THOMSON, "Review of methodologies for composite material modelling incorporating failure". *Composite Structures*, Vol.86, p.194-210, 2008.
- [2] J.S.CHARRIER *et al.*, "Proposition of 3D progressive failure approach and validation on tests cases". *14th European Conference on Composite Materials (ECCM 14)*, Budapest (Hungary), 7-6-2010.
- [3] A.A.GRIFFITH, "The phenomena of rupture and flow in solids". *Philosophical transactions of the royal society*, Vol.221, p.163-198, 1921.
- [4] D.BROEK, "Elementary Engineering Fracture Mechanics.", 4th revised ed. Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [5] G.R.IRWIN, "Fracture I". In: *Handbuch der Physik VI.*, Flügge, pp. 558-590, 1958.
- [6] D.LEGUILLON, C.LACROIX, E.MARTIN, "Interface debonding ahead of a primary crack". *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol.48, p.2137-2161, 2000.
- [7] E.MARTIN, D.LEGUILLON, N.CARRÈRE, "A twofold strength and toughness criterion for the onset of free-edge shear delamination in angle-ply laminates". *International journal of Solids and Structures*, Vol.47, p.1297-1305, 2010.
- [8] D.S.DUGDALE, "Yielding of steel sheets containing slits". *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol.8, p.100-104, 1960.
- [9] G.I.BARENBLATT, "Mathematical theory of equilibrium cracks in brittle failure". *Advances in Applied Mechanics*, Vol.7, p.55-129, 1962.
- [10] A.TURON, P.P.CAMANHO, J.COSTA, and C.G.DÁVILA, "An interface damage model for the simulation of delamination under variable-mode ratio in composite materials". *NASA/TM-2004-213277*, 2004.
- [11] G.ALFAÑO, M.A.CRISFIELD, "Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues". *International journal for numerical methods in engineering*, Vol.50, p.1701-1736, 2001.
- [12] M.ELICES, G.V.GUINEA, J.GÓMEZ *et al.*, "The cohesive zone model: advantages, limitations and challenges". *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.69, p.137-163, 2002.
- [13] O.ALLIX, P.LADEVÈZE, A.CORIGLIANO, "Damage analysis of interlaminar fracture specimens". *Composite Structures*, Vol.31, p.61-74, 1995.
- [14] S.T.PINHO, L.IANNUCCI, P.ROBINSON, "Formulation and implementation of decohesion elements in an explicit finite element code". *Composites: Part A*, Vol.37, p.778-789, 2006.
- [15] J.-F.MAIRE, J.-L.CHABOCHE, "A new formulation of continuum damage mechanics (CDM) for composite materials". *Aerospace Science and Technology*, Vol.1, p.247-257, 1997.
- [16] J.R.REEDER, "An evaluation of mixed-mode delamination failure criteria". *NASA Technical Memorandum 104210*, 1992.
- [17] P.PROMBUT, "Caractérisation de la propagation de délaminage des stratifiés composites multidirectionnels". *Thèse de Doctorat*, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2007.
- [18] M.L.BENZEGGAGH, M.KENANE, "Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus". *Composites Science and Technology*, Vol.56, p.439-449, 1996.
- [19] P.P.CAMANHO and C.G.DÁVILA, "Mixed-mode decohesion finite elements for simulation of delamination in composite materials". *NASA/TM-2002-211737*, 2002.
- [20] J.S.CHARRIER *et al.*, "Proposition d'une méthode d'analyse dédiée aux structures composites soumises à des sollicitations hors-plan". *17^{ème} Journées Nationales sur les Composites (JNC 17)*, Poitiers (France), 15-6-2011.
- [21] M.HAUTIER, "Analyse des réparations des matériaux composites: mise en oeuvre d'un procédé par infiltration et étude du comportement mécanique". *Thèse de Doctorat*, Toulouse, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 2010.
- [22] C.HUCHETTE, "Sur la complémentarité des approches expérimentales et numériques pour la modélisation des mécanismes d'endommagement des composites stratifiés". *Thèse de Doctorat*, Paris VI, Université Paris VI - Pierre et Marie Curie, 2005.